

УДК 627.59

к.т.н. Хомицький В.В., к.ф.-м.н. Кремез В.С.,
к.ф.-м.н. Терещенко Л.М., к.т.н. Горбатенко Є. Г., Абрамова Л.П.,
Інститут гідромеханіки Національної академії наук України, м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕНЕРНОГО ЗАХИСТУ ПРИБЕРЕЖНИХ ТЕРИТОРІЙ

Розглядаються результати математичного моделювання хвильового навантаження на природні пляжі та пологи укоси берегозахисних споруд.

Ключові слова: споруди інженерного захисту, вітрові хвилі, пляж, укоси берегозахисних споруд, запруды

Прояви господарської діяльності людини в береговій зоні різноманітні, але переважна її частина зв'язана з використанням природних ресурсів натуральних і штучних акваторій та боротьбою зі шкідливою дією вод, тобто з гідротехнічним та інженерним аспектами, що відносяться до спеціальних заходів з інженерної підготовки територій [1].

Інженерна діяльність в береговій зоні нерідко змінює береги і шляхи транспорту наносів, приводить до порушення природної рівноваги і розвитку негативних деформацій берегів, темпи яких перевищують природні. Крім того, в береговій зоні морів світового океану останніми роками активізуються руйнівні процеси абразії в результаті істотної зміни природно-кліматичних і екологічних умов.

Головною перешкодою на шляху комплексного використання потенційних ресурсів берегової зони є нестабільність берегів і відсутність надійних, доступних для масового використання засобів берегозахисту. Останнім часом для захисту берегів від розмиву широкого поширення набули берегозахисні споруди у вигляді насипів з полегшеним (грантовим або гравійно-щебеневим) покриттям [2].

Існуючі математичні моделі і методи розрахунку стійкості на хвилеву дію укосів таких насипів не дають можливості точного прогнозу деформацій напірного профілю насипів при тривалій дії штормового моря [3-6]. Тому для вирішення різних екологічних і інженерних завдань доцільно розвинути наближені математичні моделі практичного рівня, засновані на відомих рівняннях, балансових співвідношеннях і результатах експериментальних досліджень.

Постановка завдання. На основі результатів експериментальних досліджень і натурних спостережень прийнято вважати, що вздовжберегове переміщення частинок на підводному береговому схилі відбувається між лініями підвалини підводного схилу $f_1(x,t)$ і урізу води $f_2(x,t)$ (рис.1). Пляжеутворюю-

чий матеріал може поступати в потік на бічних межах, а також в поперечному напрямку з надводної частини схилу в підводну і переміщуватись уздовж підводного схилу. Інтенсивність схилоутворюючих процесів визначається параметрами хвиль та фізичними властивостями частинок в зоні транспорту наносів.

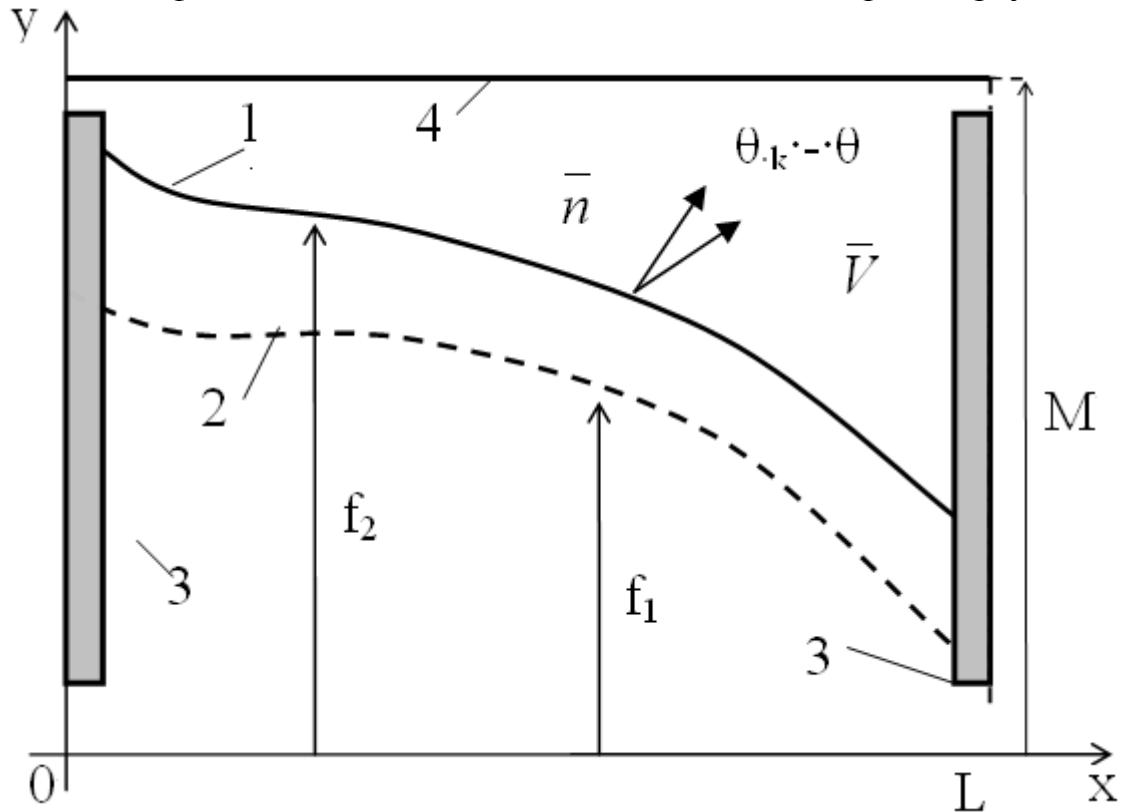


Рис. 1 Схема області моделювання: 1 – уріз води; 2 – підвалина підводного схилу; 3 – запруда; 4 – стінка набережної

У запропонованій математичній моделі відоме рівняння вздовжберегового переміщення наносів, приведене, наприклад, в роботах [3-8], доповнено складовою, отриманою на основі балансових уявлень про характер абразійно-аккумулятивних процесів на підводному береговому схилі. Виходячи з тих же міркувань, отримано також рівняння, що описує інтенсивність зміни положення підвалини підводного схилу. З урахуванням відомих уявлень про характер процесу деформації, а також співвідношень, приведених в роботах [3-8], можна записати наступні рівняння:

$$0.5(1-n)H_b \frac{\partial f_2}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{F_{\max} - (f_2 - f_1)}{(f_2 - f_1)} + \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = -B \frac{F_{\max} - (f_2 - f_1)}{(f_2 - f_1)} \quad (2)$$

Витрата Q вздовжберегового потоку наносів і інших техногенних матеріалів виражається формулою, яка отримана в результаті теоретичного аналізу хвильових процесів в прибережній зоні і обробки багаточисельних результатів експериментальних досліджень:

$$Q = A \sin 2(\theta_k - \theta) \quad (3)$$

Для параметра A , який враховує групову швидкість хвиль і механічні властивості матеріалів, що транспортуються, приймаються наступні формули:

для відкритих океанічних берегів [3,4]

$$A = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16 \sqrt{c} (\rho_s - \rho)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \quad (4)$$

для умов піщаних берегів великих водосховищ України [3]

$$A = 10^{-4} \frac{h_b^2 \lambda_b}{m^{0,75}} \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (5)$$

для умов галечних берегів Чорноморського побережжя Кавказу [7]

$$A = k_1 \frac{h_b^2 \lambda_b}{\tau} \quad (6)$$

У формулі (6) для дрібноуламкових пляжів слід приймати $k_1 = 0,0126$, а для галькових пляжів - $k_1 = 0.008$

Підставляючи формулу (3) в (1), отримаємо нелінійне диференціальне рівняння вздовжберегового транспорту наносів з урахуванням надходження матеріалів з надводної частини схилу у вигляді:

$$\mu \frac{\partial f_2}{\partial t} = -A \frac{\partial}{\partial x} \sin 2 \left(\theta_k - \arctg \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} \right) \right) + B \frac{F_{\max} - (f_2 - f_1)}{(f_2 - f_1)} + \varepsilon, \quad (7)$$

$$\text{де } \mu = 0.5 H_b (1 - n), \quad B = k_2 \frac{A}{L}, \quad \theta = \arctg \frac{\partial f_2}{\partial x}$$

У приведеному рис.1 і записаних вище рівняннях і співвідношеннях прийняті наступні позначення:

t – час, з; x – просторова координата, м; f_2, f_1 – ординати урізу води і підвалини підводного схилу відповідно, м; Q – об'ємна витрата наносів, м³/с; n – пористість наносів; F_{\max} – гранична ширина підводного схилу, відповідна заданим хвильовим умовам, м; L – довжина області моделювання, м; M – ордината стінки набережної, м.; V – об'єм насипи, м³; m – коефіцієнт укусу підводного схилу; d – усереднений діаметр частинок наносів, м; H_b – глибина води на лінії обвалення, м; h_b, λ_b – висота і довжина хвилі на лінії обвалення, м; $g=9.81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; τ – період хвилі, с; ε – інтенсивність надходження наносів за рахунок руйнування кліфа на одиницю довжини пляжу, м²/с; ρ_s, ρ – щільність наносів і води відповідно, кг/м³; θ_k – кут між променем хвилі і

віссю 0_y (або фронтом хвилі і віссю 0_x), рад (або градус); θ – кут між нормаллю до лінії берега і віссю 0_y (або дотичною до лінії берега і віссю 0_x), рад (або градус); K, k_1, k_2, c - безрозмірні емпіричні коефіцієнти.

Для визначення зони переміщення наносів на підводному береговому схилі пропонується скористатися формулою

$$F_{\max} = H_w m_{2,\max}, \quad (8)$$

де: H_w - товщина шару хвилевої переробки, середня величина якого для товщі грубозернистих наносів на лінії урізу води рівна 1...2м. На профілі з піщаних прибережно-морських наносів як розрахункову слід приймати величину активного шару, що одноразово переробляється на протязі конкретного шторму, і яка не перевищує в середньому на профілі 0,2м [3], $m_{2,\max}$ - коефіцієнт динамічної рівноваги штучного пляжу з однорідного гравійно-галькового або щебеневого матеріалу, який визначається за відсутності інших даних по формулі [3]

$$m_{2,\max} = m_0 + 0.54 \left[\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \frac{h \sqrt[3]{\lambda_0}}{d} \right]^{2/3}, \quad \lambda_0 = \frac{\lambda}{h} \quad (9)$$

де h, λ - висота і довжина хвилі на глибокій воді, м; m_0 - коефіцієнт природного укусу, значення якого для різних сипких матеріалів приведені в [3]. Для незв'язних ґрунтів крупності 0,1...1,5мм, коефіцієнт динамічно стійкого укусу можна визначати згідно [3].

Таким чином, рівняння (7) і (2) з додатковими співвідношеннями (8) і (9) утворюють замкнуту систему рівнянь, що описують зміну ординат урізу води і підвалини підводного схилу щебених відсипань, динаміка яких розглянута далі.

Для вирішення згаданої системи рівнянь задаються початкові і граничні умови. Початковими умовами є положення ліній урізу води і підвалини укусу до початку хвилевої дії (розрахункового моменту часу $t=0$), які встановлюються на основі натурних і проектних даних

$$f_1(x,0) = f_1^0(x), \quad f_2(x,0) = f_2^0(x), \quad 0 < x < L \quad (10)$$

де $f_1^0(x), f_2^0(x)$ - початкові положення підніжжя схилу і урізу води, м.

Граничні умови виражають особливості зовнішніх природних або техногенних дій на рух пляжеутворюючих матеріалів на межах області моделювання.

У разі заданого положення урізу води на відповідній межі області з координатою x_g задаються граничні умови першого роду

$$f_1(x_g, t) = f_{1g}(t), \quad f_2(x_g, t) = f_{2g}(t) \quad x_g = 0 \quad (11)$$

де $f_{1g}(t), f_{2g}(t)$ задані положення підніжжя схилу і урізу води на відповідних межах, м; T – тривалість шторму, с;

Гранична умова (11) може застосовуватися в умовах природних берегів і вільних пляжів не обмежених інженерними конструкціями.

У випадках берегів, що захищаються від розмивів за допомогою непроникних для наносів поперечних інженерних споруд (запруд) на вісі запруд задаються умови непроникності, тобто на цих спорудах витрата наносів в межах підводного схилу звертається в нуль, тому з урахуванням формули (3) отримуємо граничну умову непроникності для наносів у вигляді

$$\left. \frac{\partial f_2}{\partial x} \right|_{x=x_g} = -\tan \theta_b \quad x_g = 0 \tag{12}$$

Таким чином, рівняння (7) і (2) з початковими і граничними умовами (10) -(12), дозволяють провести різноманітні теоретичні дослідження і вирішувати прикладні екологічні і інженерні завдання методами математичного моделювання.

Деякі особливості чисельного рішення задачі.

Вирішення нелінійних диференціальних рівнянь (7) і (2) із заданими початковими і граничними умовами можливо тільки з використанням наближених чисельних методів. Найбільшого поширення при вирішенні подібних завдань набув теоретично обґрунтований метод кінцевих різниць (МКР) [6].

Введемо різницеву сітку з постійним кроком по просторовій координаті і довільним за часом. Запишемо аналоги рівнянь (1), (2) в дискретній різницевої формі

$$\mu \frac{f_{2,i}^{j+1} - f_{2,i}^j}{\Delta t_j} = -\frac{1}{\Delta x} (Q_i^{j+1} - Q_{i-1}^{j+1}) + B \frac{F_{\max} - (f_{2,i}^j - f_{1,i}^j)}{(f_{2,i}^j - f_{1,i}^j)} + \varepsilon_i^{j+1} \tag{13}$$

$$\frac{f_{1,i}^{j+1} - f_{1,i}^j}{\Delta t_j} = -B \frac{F_{\max} - (f_{2,i}^j - f_{1,i}^j)}{(f_{2,i}^j - f_{1,i}^j)} \tag{14}$$

Використовуючи (13), приведемо дискретний аналог рівняння (7) до вигляду, зручного для чисельного розв'язку. Представимо витрату наносів (3) як функцію $\frac{\partial f_2}{\partial x}$

$$Q = A \sin 2(\theta_k - \arctg u) \quad u = \frac{\partial f_2}{\partial x} \tag{15}$$

Для виділення в явній формі аргументу u у виразі для витрати (15) скористаємося методом квазілінеаризації [8], згідно якому

$$Q^{s+1} = Q^s + \left(\frac{\partial Q}{\partial u} \right) (u^{s+1} - u^s) \tag{16}$$

З виразу (15) знайдемо похідну $\frac{\partial Q}{\partial u}$

$$\frac{\partial Q}{\partial u} = A \frac{\partial}{\partial u} (\sin 2(\theta_k - \arctg u)) = -\frac{2A \cos 2(\theta_k - \arctg u)}{1+u^2} \quad (17)$$

Запишемо дискретні представлення витрат Q_i^{j+1}, Q_{i-1}^{j+1} згідно формули (16)

$$Q_i^{j+1,s+1} = Q_i^{j+1,s} + \left(\frac{\partial Q}{\partial u}\right)_i^{j+1,s} \left[\left(\frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta x}\right)_i^{j+1,s+1} - \left(\frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta x}\right)_i^{j+1,s} \right] \quad (18)$$

$$Q_{i-1}^{j+1,s+1} = Q_{i-1}^{j+1,s} + \left(\frac{\partial Q}{\partial u}\right)_{i-1}^{j+1,s} \left[\left(\frac{f_{2,i} - f_{2,i-1}}{\Delta x}\right)_{i-1}^{j+1,s+1} - \left(\frac{f_{2,i} - f_{2,i-1}}{\Delta x}\right)_{i-1}^{j+1,s} \right] \quad (19)$$

На основі дискретного представлення формул (15), (17) знайдемо значення функцій $Q_i^{j+1,s}, \left(\frac{\partial Q}{\partial u}\right)_i^{j+1,s}$ у формулі (18)

$$Q_i^{j+1,s} = A \sin 2 \left(\theta_k - \arctg \frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta x} \right)^{j+1,s}$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial u}\right)_i^{j+1,s} = -2A \left(\left(1 + \left(\frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta x} \right)^2 \right)^{-1} \cos 2 \left(\theta_k - \arctg \frac{f_{2,i+1} - f_{2,i}}{\Delta x} \right) \right)^{j+1,s}$$

Аналогічним чином можуть бути записані формули для обчислення $Q_{i-1}^{j+1,s}, \left(\frac{\partial Q}{\partial u}\right)_{i-1}^{j+1,s}$ у формулі (19).

Підстановка виразів (18), (19) і інших співвідношень в різницеве рівняння (13) дозволяє привести його до вигляду

$$a_1 f_{2,i+1}^{j+1,s+1} + a_2 f_{2,i}^{j+1,s+1} + a_3 f_{2,i-1}^{j+1,s+1} = d_1, \quad (20)$$

де i, j – номери просторового і тимчасового вузлів різницевої сітки, Δt – крок за часом, Δx – крок по просторовій координаті.

Коефіцієнти рівняння (20) a_1, a_2, a_3, d_1 залежать від значення параметрів математичної моделі, кроків різницевої сітки, а також значень шуканих функцій на попередній ітерації. У кожен розрахунковий момент часу t_{j+1} у $s+1$ ітерації рівняння вирішуються методом прогону [6].

Для реалізації описаного вище чисельного методу рішення задачі розроблена програма для ПК.

Приклад розрахунку динаміки берегозахисного насипу.

Описана вище математична модель, методика розрахунку і програма для ПК застосовувалася при дослідженні динаміки штучного щебеневого насипу, призначеного для рекреаційних цілей і захисту стінки набережної від руйнівної

дії хвиль. Прийнята проектна схема і початкові дані узяті з практики обґрунтування берегозахисних споруд для одного з районів Південного берега Криму. Рекреаційна зона, що включає набережну і штучний щебеневий пляж розміщена на місці конуса винесення зсуву, який відбувся раніше. Для зменшення руйнівної дії штормових хвиль на підводному береговому схилі по всій довжині ділянки захисту передбачено зведення підводної берми з гірської маси завдовжки 180 м на відмітці $-3,0$ м. На бермі відсипаний пляж з частинок діаметром $d = 0.02$ м на відмітці $+2,5$ м. На краях ділянки захисту штучний пляж обмежений непропусками у вигляді гравітаційних заград.

Метою математичного моделювання є визначення динаміки переформування пляжевого відсипання при дії найбільш хвиленебезпечного косопідходячого до берега шторму тривалістю в 1 добу, а також ефективності роботи додаткових регулюючих заград.

Для розглянутого модельного завдання приймалися наступні початкові дані.

$f_1^0 = 33.5$ м, $f_2^0 = 38$ м; $n = 0.4$; $F_{\max} = 28$ м; $L = 180$ м; $M = 67$ м.; $m = 14$; $d = 0.02$ м; $H_b = 1.92$ м; $H_w = 3$ м; $m_{2,0} = 1.5$; $\lambda = 42.8$ м; $\tau = 5$ с; $\varepsilon = 0$; $\rho_s = 2500$ кг/м³; $\rho = 1010$ кг/м³; $K = 0.23$, $k_1 = 0.003$; $k_2 = 0.007$; $\theta_k = 27^\circ$; $T = 86400$ з (1 доба).

Ширина пляжевої відсипки від стінки набережної до урізу води в початковий момент часу складала 30 м, а відстань від стінки набережної укусу – 42.5 м. При чисельному рішенні задачі крок за часом приймався $\Delta t = 1$ с, а крок по простору $\Delta x = 1$ м. На межах області моделювання розташовані непроникні заград.

Положення урізу води і підвалини підводного схилу в деякі моменти розрахункового періоду часу показані на рис. 2-5. Із рис.2, а також рис. 5 видно, що поблизу межі $x = 180$ м сформувалася зона розмиву насипу і безпосереднього контакту із стінкою набережної. Для запобігання розмиву було запропоновано будівництво однієї або двох внутрішніх заград, а результати моделювання для цих випадків показані на рис. 3-4.

На рис. 5 показана зміна ширини захисному насипу протягом розрахункового періоду часу на межі області моделювання $x = 180$ м, де найбільшою мірою виявляється руйнівна дія хвиль.

Аналіз результатів розрахунків для приведеного випадку вільного пляжу показує, що в моменти часу, близькі до початкового (приблизно до 1 години від моменту початку шторму) відбувається інтенсивне виположування підводного укусу, уріз води зміщується до стінки набережної, а підвалина підводного укусу зміщується у бік глибокої води (рис. 2). У подальші моменти часу інтенсивність виположування сповільнюється, лінії урізу води і підвалини укусу праг-

нуть зайняти положення ортогональне променю хвилі. Процеси розвороту урізу води ортогонально променю хвилі відбуваються інтенсивніше за наявності однієї, а тим більше – двох внутрішніх запруд (рис. 3-4). Будівництво однієї або двох додаткових внутрішніх запруд дозволяє зменшити небезпечні дії на стінку набережної і зберегти більш рівномірну ширину насипу по довжині області моделювання. За відсутності внутрішніх запруд ширина надводної частини насипу рівна 0 з моменту часу $t = 61600\text{с}$ (~17годин), а для випадку однієї внутрішньої буни ширина надводної частини насипу на кінець розрахункового періоду часу складає 1.91 м, а для двох запруд – 7.3 м., що дозволяє рекомендувати варіант з двома внутрішніми запрудами як основний проектний варіант.

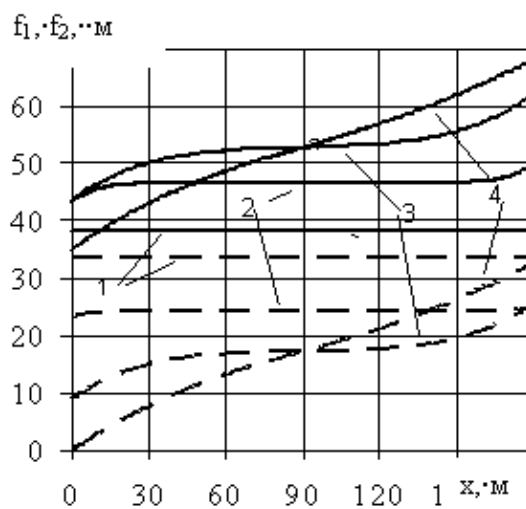


Рис. 2. Положення урізу води (-----) і підвалини схилу ((- - -)) без внутрішніх запруд в моменти часу: 1 - $t=0\text{ с}$; 2 - $t=3600\text{ с}$ (1 година); 3 - $t=21600\text{ с}$ (6ч); 4 - $t=86400\text{ с}$ (1 доба).

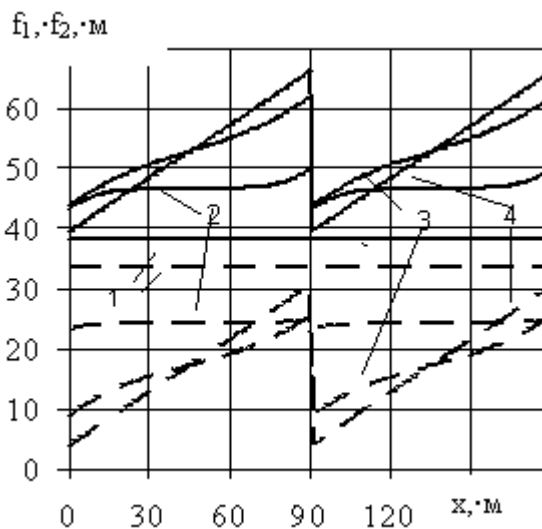


Рис. 3. Положення урізування води (-----) і підніжжя схилу ((- - -)) за наявності однієї внутрішньої запруди в моменти часу: 1 - $t=0\text{ с}$; 2 - $t=3600\text{ с}$ (1ч); 3 - $t=21600\text{ с}$ (6годин); 4 - $t=86400\text{ с}$ (1 доба).

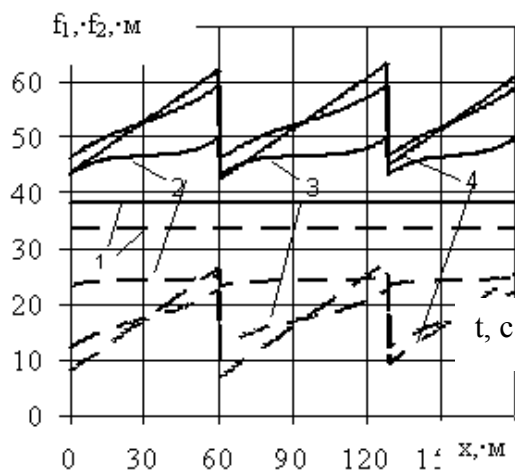


Рис. 4. Положення урізу води (----) і підвалина схилу ((- - -)) за наявності двох внутрішніх запруд в моменти часу: 1 - $t=0$ с; 2 - $t=3600$ с (1ч); 3 - $t=21600$ с (6годин); 4 - $t=86400$ с (1 доба).

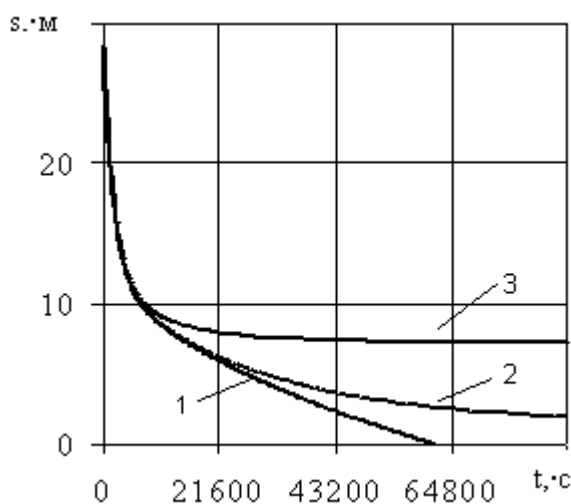


Рис. 5. Зміна ширини надводній частині насипу при $x=180$ м ($s = M - f_2(180, t)$) 1 - у разі відсутності внутрішніх запруд; 2 - у разі однієї внутрішньої запруд та випадку двох внутрішніх запруд.

Висновки. Запропонована система рівнянь розширює можливості математичного моделювання динаміки штучних вільних і техногенних пляжів. Розроблено алгоритм чисельного розв'язку задачі методом кінцевих різниць на основі квазілінеаризації нелінійних складових початкових рівнянь, який показав свою ефективність при розв'язку модельних і практичних завдань за допомогою розробленої програми для ПК.

Список літератури

1. ДБН 360-92* Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень. - К.: Мінбудархітектури України, 1993. – 107 с.
2. Інженерний захист та освоєння територій. Довідник. За редакцією к.т.н. В.С.Ніщука – К.: “Основа”, 2000. –344 с.

3. Хомицкий В.В. Природоохранные аспекты береговой гидротехники. - К.: Наук думка, 1983.-247 с.

4. Hans Hanson† and Nicholas C. Kraus Long-Term Evolution of a Long-Term Evolution Model \ Journal of Coastal Research, SI, № 59, pp. 118-129, West Palm Beach, Florida 2011.

3. Selezov I., Volynski R. Wave Refraction and Sediment Dynamics Modeling in Coastal Zone/ Київ: SMP “ AVERS ” -2013. - 150 p.

5. Thieler E. Robert, Pillkey Orrin H., Young Robert S., Bush David M., Chai Fei. The Use of Mathematical Models to Predict Beach Behaviour for U.S. Coastal Engineering: A Critical Review \ Journal of Coastal Research, Vol. 16, №1, pp. 48-70, Royal Palm Beach, Florida, Winter 2000.

6. Ernest R. Smith†, Ping Wang‡, Bruce A. Ebersole†, and Jun Zhang. Dependence of Total Longshore Sediment Transport Rates on Incident Wave Parameters and Breaker Type \ Journal of Coastal Research 25 3 675–683 West Palm Beach, Florida May 2009.

7. Рекомендации по проектированию и строительству свободных галечных пляжей//Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства (ЦНИИС), Москва, 1988, 85 с.

8. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. - М: Наука, 1971.- 552 с.

Аннотация

Рассматриваются результаты математического моделирования волновой нагрузки на естественные пляжи и пологие откосы берегозащитных сооружений.

Ключевые слова: сооружения инженерной защиты, ветровые волны, пляж, откосы берегозащитных сооружений, буны

Annotation

The results of mathematical modeling of wave loading on natural beaches and gentle slopes bank protection structures.

Keywords: constructions of engineering protection, wind waves, beach, slopes of bank protection constructions